第41卷　第11期
2024年11月

干　旱　区　研　究
ARID　ZONE　RESEARCH

Vol. 41　No. 11
Nov. 2024

哈密市戈壁表层土壤理化性质及质量现状

张久丹[1,2]，　张爱国[3]，　靳镜宇[1,2,4]，　刘帅琪[1,2]，　吴　瀚[1,2]，　李均力[1]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所，干旱区生态安全与可持续发展全国重点实验室，荒漠与绿洲生态国家重点实验室，新疆 乌鲁木齐　830011；2. 中国科学院大学，北京　100049；3. 生态环境部南京环境科学研究所，江苏 南京　210042；4. 新疆维吾尔自治区测绘成果中心，新疆 乌鲁木齐　830002）

摘　要：戈壁土壤质量对其表层植被覆盖及生态恢复具有重要意义。本研究采集了哈密市戈壁区域的56个典型土壤样本，分别从土壤含水量、土壤容重、pH、总盐、有机质、全氮、全磷和全钾等8个指标分析土壤质地、盐分和养分特性，并构建土壤质量指数(Soil Quality Indicator，SQI)开展土壤质量综合评价。结果表明，哈密市戈壁区域的土壤质量普遍较低，戈壁表层砾石覆盖度高，土壤含水量低，盐碱化严重，土壤养分条件差。空间差异上，伊吾县和巴里坤哈萨克自治县土壤质量平均水平略高于伊州区，尤其戈壁边缘与其他地类过渡区域的土壤质量较高。总体而言，哈密市戈壁全区域及各分区土壤质量均处于较低水平(SQI介于0.4~0.5)，呈现出从北到南下降的趋势。研究强调了加强环境保护和可持续发展措施的必要性，以应对人类活动增加对生态环境的影响。

关键词：戈壁；土壤养分；砾石覆盖；盐碱化；土壤质量指数；哈密市

戈壁是形成于干旱极干旱气候条件下的地表覆盖砾石的一种独特地理景观[1]。戈壁表面的砾幕层能有效减少风沙的移动和扩散、对土壤保持和风沙治理起着关键作用[2]。哈密是我国黑戈壁的主要分布区，戈壁表层覆盖了大量的砾石、沙砾和盐碱斑块，干河床及低洼区分布着稀疏的荒漠植被[2-3]。随着人类活动的增加，特别是新能源基地建设、矿产开发和道路建设等，戈壁的砾幕层被碾压破坏，导致下层土壤裸露、风沙增加和戈壁植被退化等一系列环境问题[3-4]。分析戈壁土壤的理化性质和评估戈壁土壤质量水平有助于了解土壤的养分状态和空间差异，对于戈壁区生态修复具有重要意义。

土壤是植被生长和陆地生态系统维持的物质基础[5-6]，土壤质量是土壤肥力、生态健康的综合表现[6]。土壤质量主要采用土壤质量指数(SQI)量化评估，SQI是由多种理化指标构建的综合指数，可用于不同区域、尺度和不同生态系统类型的土壤质量评价[7-8]。土壤理化指标主要包括土壤含水量、土壤容重、土壤孔隙度、有机质含量、氮磷钾等养分含量、pH值[9-10]等。目前针对耕地、草地和森林等生态系统的土壤理化特征和质量评估已开展了大量研究[4,9,11]，包括不同类型土壤理化性状特征分析[9,12]、土壤微生物群落分布特征[12-13]、环境变化对土壤理化性状的影响[13-14]、不同土壤类型的质量评估及驱动[13]等。然而，由于独特的自然环境和地质条件，戈壁土壤与其他类型土壤有显著差异[1,5]。目前，有关戈壁土壤的研究集中于戈壁土壤形成及发育过程[2,15]、地表砾石覆盖及沉积物特征[16-17]、戈壁土壤理化性质[18]、土壤风蚀[19]，以及戈壁植被时空分布[3,20]等，然而有关戈壁土壤质量综合评估的研究还不充分。

本研究以新疆哈密市戈壁为调查对象，通过采集戈壁区域的典型土壤样本，获取戈壁土壤的表层结构、理化特性及养分状况，并构建基于土壤理化性质的综合质量指数，分析戈壁土壤质量的空间特征，增加对戈壁土壤特性的规律性认识，从而为改

收稿日期：2024-06-07；　**修订日期**：2024-09-04
基金项目：第三次新疆综合科学考察(2021XJKK1400)；哈密市戈壁生态调查评价与保护修复项目(202306160842)；天山英才科技创新团队(2022TSYCTD0006)
作者简介：张久丹(1995-)，女，博士研究生，主要从事环境遥感研究. E-mail: zhangjiudan18@mails.ucas.ac.cn
通讯作者：张爱国. E-mail: zhangaiguo@nies.org

善和保护戈壁生态系统提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

哈密市位于我国新疆的东部(40°49′42″~45°08′56″N,91°08′56″~96°24′55″E),其戈壁区主要分布在天山山脉南北麓的冲积扇和平原地区[5,21]。该地区属于典型的大陆性干旱气候,夏季高温炎热,冬季寒冷干燥。年均气温约为9~11 ℃,年均降水量约为50~100 mm,蒸发量则高达2000 mm以上[22]。哈密地区的戈壁地貌以堆积型戈壁为主,剥蚀型戈壁为辅,其中堆积型戈壁分布在山前洪积扇区域,剥蚀型戈壁分布在石质平原或碎石覆盖具有残丘岛山的平原区域[2,21]。戈壁土壤类型主要为棕漠土、灰棕漠土、棕钙土和石质土等[21],植被主要以耐旱的荒漠植物为主,如膜果麻黄、无叶假木贼和骆驼刺等[3],沿干河床、潜水溢出带带状分布,植被覆盖率极低。由于气候极端干旱、地表水资源匮乏、潜在蒸发强烈,土壤的盐分含量高[3]。哈密市的戈壁生态环境恶劣,但拥有优越的孕矿地质条件,是新疆中游的煤、石油、金属等矿产资源基地,具有适宜风能、太阳能开发的气候条件,能源矿产开发的潜力较大。

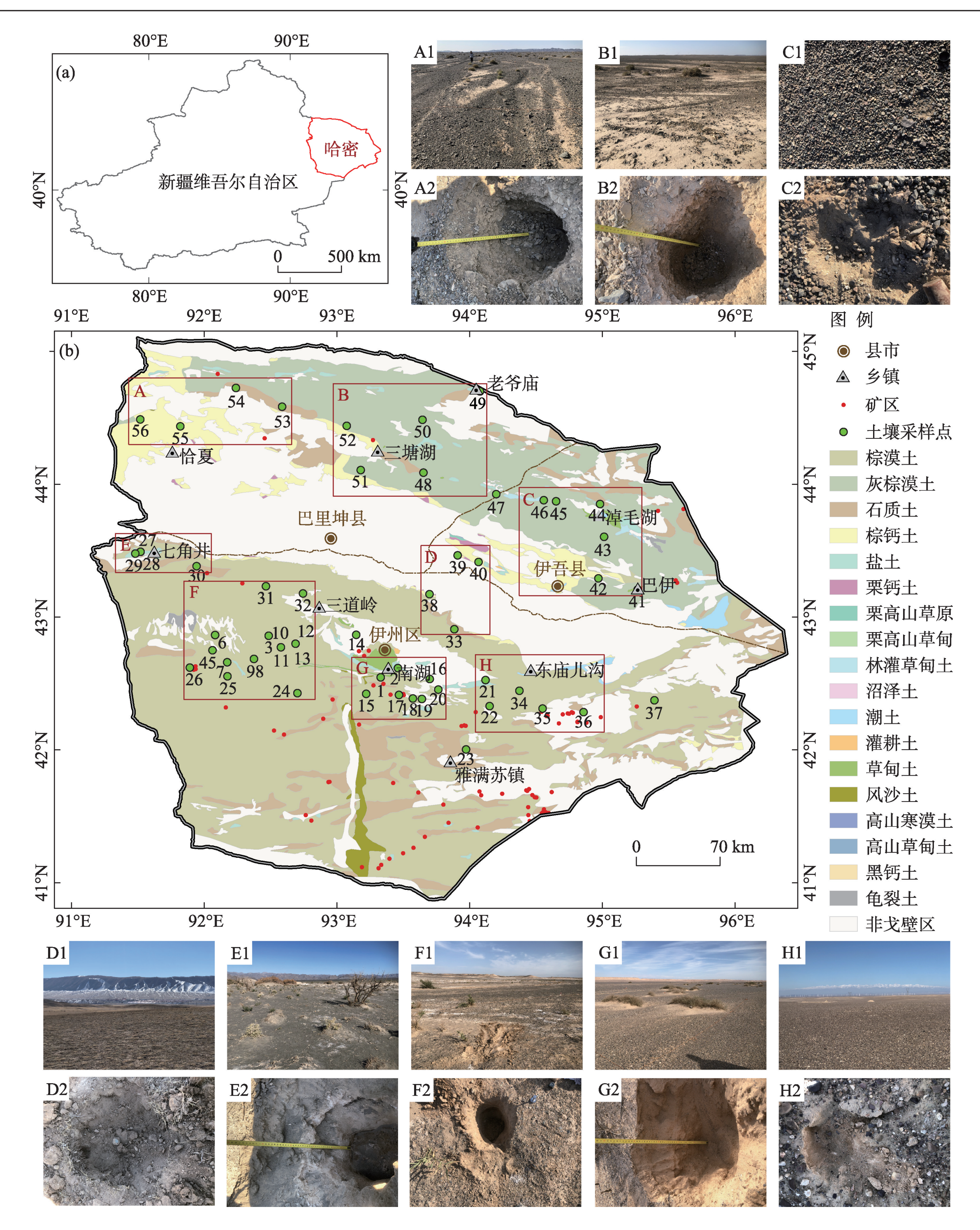
1.2 土壤采样、预处理及性质测定

1.2.1 *样地设置和土壤采样* 本次调查主要包括哈密境内东天山南北麓的堆积型戈壁和剥蚀型戈壁。由于戈壁面积很广,本研究结合戈壁分布的自然特点、戈壁的土壤类型和取样难度,基于高分遥感底图选择各类典型戈壁做土壤调查和取样,大致位置包括8个小区域(图1)。并于2023年9—10月共开展两次土壤调查工作,实际采样点位视现场情况稍作调整。两次调查共获取56个土壤样本,其中堆积型戈壁和剥蚀型戈壁的采样比例为2:1。采样点土壤类型包括棕漠土、灰棕漠土、石质土、棕钙土、盐土和草甸土,大部分土壤样本取自前四种主要的戈壁土壤类型。鉴于该区域戈壁表层覆盖的沉积物以砾石为主,砾石通常覆盖于沙和黏土的混合物之上或与其他成分混合分布[2,4]。取样时先用标尺框(大小为30 cm×30 cm)确定采样范围,通过调焦使数码相机恰好垂直拍摄标尺框范围的区域,并根据标尺框大小与数字图像真实尺寸之间的比例估算表层砾石的实际大小[2]。然后用钢尺将戈壁表面所覆盖的砾石轻轻拨开,用取样铲在采样区域内按照距离地表10 cm、20 cm和40 cm的深度采集土壤样品,每个区域每两个采样点之间相距约1~20 km。但由于部分地区深层取样困难,只采集距离地表10 cm深度的样本。因此本研究用于理化性质分析和质量评估的各项测定指标均来自距离地表10 cm的土壤样本。考虑到不同区域戈壁地质地貌和土壤类型分布的不同,其采样点的数量有一定差异,具体位置见图1。

1.2.2 *土壤样品预处理及测定* 本研究测定的土壤样品理化指标包括砾石覆盖度、土壤容重、土壤含水量、pH值、总盐、有机质、全氮、全磷和全钾。由于戈壁表层沉积物的砾石含量高,无法直接磨样和压样,对采集到的土壤样品用筛分法做分级处理并去除粒径大于2 mm的砾石,然后再进行元素分析。首先在实验室将采集的新鲜土壤样品自然风干(环刀法采集的容重样品、用于测定含水量的样品除外),将土壤样品平铺在硫酸纸上,摊成薄层于阴凉通风处风干。用四分法分取适量的风干样品,剔除土壤以外的物质,如动植物残体和小石块等,再将土壤碾碎,使其全部通过2 mm孔径的试验筛。将过筛后的土壤样本混合均匀装入袋中备用。在测定时,砾石覆盖度采用相机拍摄估算法,是利用采样时垂直拍摄的图像估算砾石的粒径大小,统计粒径大于2 mm的砾石所占像元数,与图像总像元数的比值即为砾石覆盖度估算值。土壤容重的测定采用环刀法[23];土壤含水量测定采用烘干法;土壤pH值测定采用电位法[24];总盐测定采用电导率法[24];土壤有机质测定采用重铬酸钾氧化法测量[25];全氮的测定采用燃烧法;全磷测定采用$HClO_4$–H_2SO_4氧化钼锑抗分光光度法;全钾测定采用NaOH熔融–火焰光度法[26]。

1.3 土壤质量评价方法

土壤物理性质和化学性质能体现土壤质量和养分水平[6]。在戈壁地区,土壤环境具有独特的干旱、半干旱特征,土壤中水分和养分的含量普遍较低,且土壤的盐渍化程度较高[2,4]。因此,本文在研究土壤质量时选择具有代表性的物理指标(土壤含水量、土壤容重、pH值、总盐)和化学指标(有机质、全氮、全磷和全钾)进行哈密市戈壁土壤质量综合评价[4-5,11]。土壤含水量和土壤容重是衡量土壤水分



注:底图采用新疆维吾尔自治区自然资源厅标准地图制作,审图号为新S(2021)047号,对底图边界无修改。

A1~H1为采样区域A~H的土壤环境,A2~H2为对应的取样点。下同。

图1 哈密的地理位置及戈壁土壤采样点分布

Fig. 1 Geographical location of Hami City and distribution of Gobi soil sampling sites

保持能力和结构紧实程度的重要指标,影响土壤的生态功能和植物生长条件。pH值和总盐则是土壤化学性质的关键指标,反映了土壤的酸碱度和盐渍化程度,对土壤养分有效性和微生物活性有直接影响。有机质、全氮、全磷和全钾作为土壤养分的主要来源,决定了土壤的肥力水平和植物营养供给能力,对戈壁植被群落发展十分重要。为了统一各指标的量纲,基于线性隶属度函数对各土壤理化性质

指标进行标准化,包括升型分布函数("越多越好"型指标)和降型分布函数("越少越好"型指标)(公式1~公式2)[27],然后对处理后的数据进行KOM检验、Bartlett球体检验和显著性检验,以验证主成分分析方法的可行性。同时,通过计算各指标特征值和方差贡献率,选择特征值大于0.5并解释至少5%总方差的主成分进行研究。结合主成分的方差贡献率、载荷系数和在土壤质量中的重要程度确定综合得分模型中的系数(公式3),最后运用土壤质量指数(SQI)对戈壁土壤质量进行综合评价(公式4)。

升型分布函数计算公式如下:

$$Q(X_i)=\frac{(X_{ij}-X_{i\min})}{(X_{i\max}-X_{i\min})} \tag{1}$$

降型分布函数计算公式如下:

$$Q(X_i)=\frac{(X_{i\max}-X_{ij})}{(X_{i\max}-X_{i\min})} \tag{2}$$

式中:$Q(X_i)$是指各土壤指标的隶属度值;X_{ij}为土壤各指标值;$X_{i\max}$和$X_{i\min}$分别指第i项土壤指标中的最大值和最小值。

$$W_i=\frac{C_i}{\sum_{i=1}^{n}C_i} \tag{3}$$

式中:W_i是各指标的权重;C_i是各评价指标的公因子方差;n是参评指标的数量。

土壤质量指数的计算公式如下:

$$\mathrm{SQI}=\sum_{n=1}^{n}W_iS_i \tag{4}$$

式中:W_i为第i个指标的权重系数;S_i为第i个指标的隶属度值;n为参评指标的数量。SQI越大,表示土壤质量越高。

2　结果与分析

2.1　戈壁土壤理化特征及空间差异

56个土壤样品分析如表1所示,各个指标的敏感程度一般采用变异系数(C_v)表示,C_v越大说明评价指标对土壤质量的差异性越敏感,可分为4种类型:不敏感指标C_v<10%;低敏感指标10%≤C_v<40%;中等敏感指标40%≤C_v<100%;强敏感指标C_v≥100%。由表1可知,砾石覆盖度、土壤含水量、总盐、有机质和全氮为强敏感指标(C_v≥100%),土壤容重和全钾属于中等敏感指标(40%≤C_v<100%),全磷属于低等敏感指标(10%≤C_v<40%),而pH的C_v为5.61%,属于不敏感指标(C_v<10%)。

2.1.1　*砾石覆盖度和土壤容重特征*　砾石覆盖度反映了戈壁表层的砾石层结构特征,覆盖度越高说明戈壁的抗风沙性越好,下层沙土和壤土的稳定性也越好。总体来看,哈密市戈壁地区的土壤紧实度普遍较高,而砾石覆盖度有明显的空间差异。戈壁56个土壤样本的砾石覆盖度均值为22.53%,变异系数为123.69%,表明不同土壤样点的结构差异较大,砾石覆盖度的变异性较高(表1)。从表2的分区统计来看,伊州区砾石覆盖度均值为15.29%,变异系数高达158.04%,显示了极高的变异性特征。巴里坤哈萨克自治县(以下简称巴里坤县)和伊吾县土壤的砾石覆盖度均值分别为41.36%和34.97%,变异系数C_v分别为82.66%和77.12%,说明这两个地区戈壁土壤的砾石含量较高,采样区的空间差异较小。

土壤容重主要表征土壤紧实度,值越小说明土壤结构较好,通气透水能力强;反之,则土壤结构紧实,通透性差。按照中国土壤属性分级标准,把土

表1　哈密市戈壁土壤理化指标描述性统计

Tab. 1　Descriptive statistics of soil physicochemical indicators in the Hami Gobi

土壤指标	最小值	最大值	平均值	标准差	中位数	变异系数C_v/%	养分等级水平
砾石覆盖度/%	0.10	89.70	22.53	27.87	9.25	123.69	-
土壤含水量/%	0.47	10.71	1.95	2.03	1.41	104.25	-
土壤容重/(g·cm^{-3})	1.00	2.18	1.64	0.31	1.69	19.06	-
pH	7.64	9.99	8.58	0.48	8.54	5.61	-
总盐/(mg·kg^{-1})	0.34	855.00	66.32	169.10	8.31	254.97	-
有机质/(g·kg^{-1})	0.87	50.00	5.12	7.11	2.95	138.85	六
全氮/(g·kg^{-1})	0.02	3.27	0.34	0.47	0.20	138.75	六
全磷/(g·kg^{-1})	0.08	0.87	0.48	0.19	0.45	39.94	四
全钾/(g·kg^{-1})	2.70	32.40	22.43	5.00	23.45	22.28	二

壤容重分为六级：过松(<1.00 g·cm^{-3})、适宜(1.00~1.25 g·cm^{-3})、偏紧(1.25~1.35 g·cm^{-3})、紧实(1.35~1.45 g·cm^{-3})、过紧实(1.45~1.55 g·cm^{-3})、坚实(>1.55 g·cm^{-3})。研究区戈壁土壤容重均值为1.64 g·cm^{-3}，属于坚实水平，变异系数C_v为19.06%，属于低敏感变异性(表1)；三个地区的土壤容重均值均高于1.55 g·cm^{-3}，且变异系数均小于20%(表2)，表明哈密市戈壁地区土壤紧实度、密度普遍较高。

2.1.2 土壤盐度分析 土壤含水量、pH和总盐三个指标结合反映了戈壁土壤的盐碱化水平。从表1可知，研究区戈壁的土壤含水量平均值为1.95%，C_v为104.25%，说明该地区土壤含水量极低，不足以支持植被生存所需的水分要求，且土壤含水量指标的变异性极强，其对外界环境因子的变化有较明显的响应。土壤pH平均值为8.58，C_v在所有指标中最低为5.61%，说明哈密市戈壁地区的土壤普遍呈碱性，且空间差异性较小。土壤的总盐平均值为66.32 mg·g^{-1}，表明土壤含盐量较高，实地调查发现不少样点存在不同程度的盐渍化现象。综合来看，哈密市戈壁的土壤含水量极低，土壤偏碱性，同时戈壁地区的盐碱化程度明显。

2.1.3 戈壁土壤养分特征分析 根据全国第二次土壤养分等级标准(表3)，哈密市戈壁土壤有机质含量的均值为5.12 g·kg^{-1}，为六级水平，处于极度贫瘠化水平。黑戈壁干旱少雨，高温高蒸发，造成戈壁土壤板结化严重，不利于有机质的积累；同时，大部分地区处于盆地边缘，沙化和荒漠化情况比较严重，基础肥力较弱。土壤全磷含量处于四级水平，均值为0.48 g·kg^{-1}，且土壤全磷的C_v为39.94%，属于低敏感度指标。这主要是由于磷元素在土壤中运动较慢，其空间分布的不均匀性难以随时间推移而改善，导致土壤全磷的C_v较低。土壤全钾均值为22.43 g·kg^{-1}，处于二级水平，钾含量较高，主要是由于戈壁长期累积的矿物成分在风化和分解后容易积累钾元素。全氮是土壤氮素的容量指标，戈壁土壤全氮的均值为0.34 g·kg^{-1}，处于六级水平，含量极低，属于重度贫瘠化水平。

2.2 戈壁土壤质量指数构建与分析

选择土壤含水量和土壤容重、pH、总盐、有机质、全氮、全磷、全钾等共8项指标构建戈壁土壤质量指数(SQI)。需要注意的是砾石覆盖度仅表征了土壤表层组成特征，对土壤质量无直接影响，因此在土壤质量指数构建时未列入。

2.2.1 土壤主要指标的相关性分析 从表4可知，8项土壤质量指标之间的独立性较高，能相对全面的反应哈密市戈壁地区土壤的质量水平。有机质与全氮呈显著正相关(相关系数为0.97)，总盐和全钾之间呈显著负相关(相关系数为-0.72)。其他指标之间的相关系数部分呈现出了一定显著性，但相关系数绝对值均小于0.60。

表2 不同地区土壤砾石覆盖度和土壤容重的描述性统计

Tab. 2 Descriptive statistics of gravel cover and soil bulk density of soils in different areas

指标	区域	最小值	最大值	平均值	标准差	中位数	变异系数C_v/%
砾石覆盖度/%	巴里坤县	2.10	80.50	34.97	26.97	35.15	77.12
	伊吾县	0.20	83.10	41.36	34.19	38.30	82.66
	伊州区	0.10	89.70	15.29	24.17	1.35	158.04
土壤容重/(g·cm^{-3})	巴里坤县	1.00	2.14	1.83	0.36	1.94	19.73
	伊吾县	1.28	2.06	1.69	0.29	1.69	16.88
	伊州区	1.01	2.18	1.57	0.29	1.63	18.28

表3 土壤养分等级标准

Tab. 3 Soil nutrient classification standards

土壤指标	一级	二级	三级	四级	五级	六级
	很高	高	中上	中下	低	很低
有机质/(g·kg^{-1})	>40	30~40	20~30	10~20	6~10	<6
全氮/(g·kg^{-1})	>2.00	1.50~2.00	1.00~1.50	0.75~1.00	0.50~0.75	<0.50
全磷/(g·kg^{-1})	>1.00	0.80~1.00	0.60~0.80	0.40~0.60	0.20~0.40	<0.20
全钾/(g·kg^{-1})	>25	20~25	15~20	10~15	5~10	<5

表4 哈密市戈壁土壤质量指标之间的相关性

Tab. 4 Correlation between soil quality indicators in the Hami Gobi

	土壤含水量	土壤容重	pH	总盐	有机质	全氮	全磷	全钾
土壤含水量	1							
土壤容重	−0.50**	1						
pH	−0.47**	0.32*	1					
总盐	−0.03	−0.52**	−0.13	1				
有机质	0.29*	−0.26	−0.06	0.09	1			
全氮	0.31*	−0.20	−0.05	−0.01	0.97**	1		
全磷	−0.10	0.33*	0.02	−0.39**	0.25	0.33*	1	
全钾	−0.40**	0.57**	0.37**	−0.72**	0.04	0.10	0.31*	1

注：*表示 $P<0.05$；**表示 $P<0.01$。

2.2.2 土壤质量指数的构建 对土壤质量指标进行偏相关KMO和Bartkett球形度检验（KMO值为0.55>0.5），表明该数据集适合进行主成分分析。选择特征值大于0.5并解释至少5%总方差的主成分进行分析，得到土壤质量指标的载荷系数、公因子方差和主成分权重（表5）。各主成分特征值越大越能代表土壤指标体系特性，由表5可知特征值>0.5的主成分有4个，其累计贡献率可达88.07%，能够解释土壤质量指标的大部分信息。本次分析共提取出的4个主成分，其对应的加权后方差解释率即权重依次为：35.74/88.07=40.58%，28.32/88.07=32.16%，14.63/88.07=16.61%，9.38/88.07=10.65%。

2.2.3 戈壁土壤质量分析 利用公式4计算得到哈密市戈壁的土壤质量指数，对所有采样点的土壤质量进行统计分析得到表6。根据研究区特征和先前研究[28-29]，对计算所得的土壤质量指数进行相对分级（表7）。从表6可以看出，哈密市戈壁的土壤质量指数结果中没有异常值，全区域SQI的变异系数C_v为20.31%，表明调查点的土壤质量水平变异性较小，其计算结果具有良好的数据表现性。哈密市全区域SQI的平均值和中位数均为0.44，说明本次调查中的戈壁土壤质量水平普遍较低。但全区域SQI的最大值为0.87（出现在伊吾县），最小值为0.20（出现在伊州区），说明土壤质量在区域之间存在较大的差异。根据表7的土壤质量相对水平分级，可以发现哈密市戈壁地区的土壤质量水平处于较低水平的区域较多，而处于中等水平的区域占比较少，处于高水平的区域极少。在三个分区，土壤质量的相对水平表现为伊吾县>巴里坤县>伊州区，但SQI平均值均为0.40~0.50，说明三个地区的土壤质量均处于较低水平。

从SQI的空间分布来看（图2），哈密市戈壁地区的土壤质量水平在三个子区域存在明显的空间分异性。伊吾县土壤质量水平高于其他两个地区，其SQI平均值为0.50。这主要是因为伊吾县西南部戈壁的土壤质量较其他区域略高，土壤水分含量相对

表5 土壤质量指标的载荷系数、公因子方差和主成分权重

Tab. 5 Loading coefficients, common factor variance and principal component weights of soil quality indicators

指标名称	PC-1	PC-2	PC-3	PC-4	公因子方差	权重/%
特征根	2.86	2.27	1.17	0.75	–	–
方差解释率/%	35.74	28.32	14.63	9.38	–	–
土壤含水量	−0.65	0.27	−0.53	−0.33	0.88	13.67
土壤容重	0.84	0.02	−0.08	0.16	0.75	9.77
pH	0.54	−0.03	0.65	−0.31	0.80	11.10
总盐	−0.67	−0.34	0.54	0.31	0.95	14.51
有机质	−0.35	0.87	0.30	−0.04	0.97	13.10
全氮	−0.28	0.92	0.23	−0.04	0.98	12.38
全磷	0.37	0.59	−0.19	0.59	0.87	12.95
全钾	0.81	0.36	−0.02	−0.27	0.85	12.53

表6 哈密市戈壁土壤质量指数(SQI)的描述性统计

Tab. 6 Descriptive statistics of soil quality index (SQI) in the Hami Gobi

	最小值	最大值	平均值	标准差	中位数	变异系数 C_v/%
全区域	0.20	0.87	0.44	0.09	0.44	20.31
巴里坤县	0.41	0.55	0.46	0.05	0.46	11.27
伊吾县	0.35	0.87	0.50	0.16	0.46	31.81
伊州区	0.20	0.56	0.42	0.07	0.42	16.88

表7 哈密市戈壁土壤质量相对水平分级

Tab. 7 Classification of relative levels of soil quality in the Hami Gobi

土壤质量指数	<0.4	0.40~0.50	0.50~0.60	≥0.6
土壤质量分级	四	三	二	一
土壤质量水平	低	较低	中	高

较高,地表覆盖以较湿润的壤土及砾石组合为主,土壤类型主要是草甸土、栗钙土等营养成分较高的类型。该区域的样点在SQI上表现出相对较高的质量水平,提高了伊吾县的平均质量水平。而巴里坤县土壤质量相对一致,C_v仅为11.27%,表明该地区的土壤质量水平在空间上较为稳定。然而,SQI的平均值和中位数均为0.46,说明巴里坤县土壤的整体肥力较低,使其土壤质量虽较一致,但仍处于较低水平。相比之下,伊州区土壤质量最低,其SQI平均值仅为0.42,尤其在三道岭南侧、南湖东南侧以及七角井区域,说明该区域戈壁土壤贫瘠和结构松散的特性。区域内SQI最大值为0.56,分布在南湖西北侧的戈壁与其他地类的过渡带,属于中等质量水平。

3 讨论

3.1 哈密市戈壁砾石覆盖对风沙运动的影响

由于戈壁地表组分、砾石盖度、分布形式的不同使得戈壁在空间上具有显著的景观差异,戈壁地表风沙运动特征也因其景观差异而不同[15]。研究表明砾石覆盖度和风沙运动强度呈负相关关系,风沙运动强度随着砾石覆盖度的增加而降低[30],而风沙运动在风蚀、风积等过程中改变地表组分,下垫面砾石盖度亦发生改变[31],二者呈现互相影响的耦合关系。此外,当砾石覆盖度增加至30%~35%即可以有效抑制戈壁地区的风蚀现象,降低风沙频率和强度[31-32]。研究区56个土壤取样测定结果表明,除冲积/洪积扇上部外,戈壁表层覆盖以不同粒径的砾

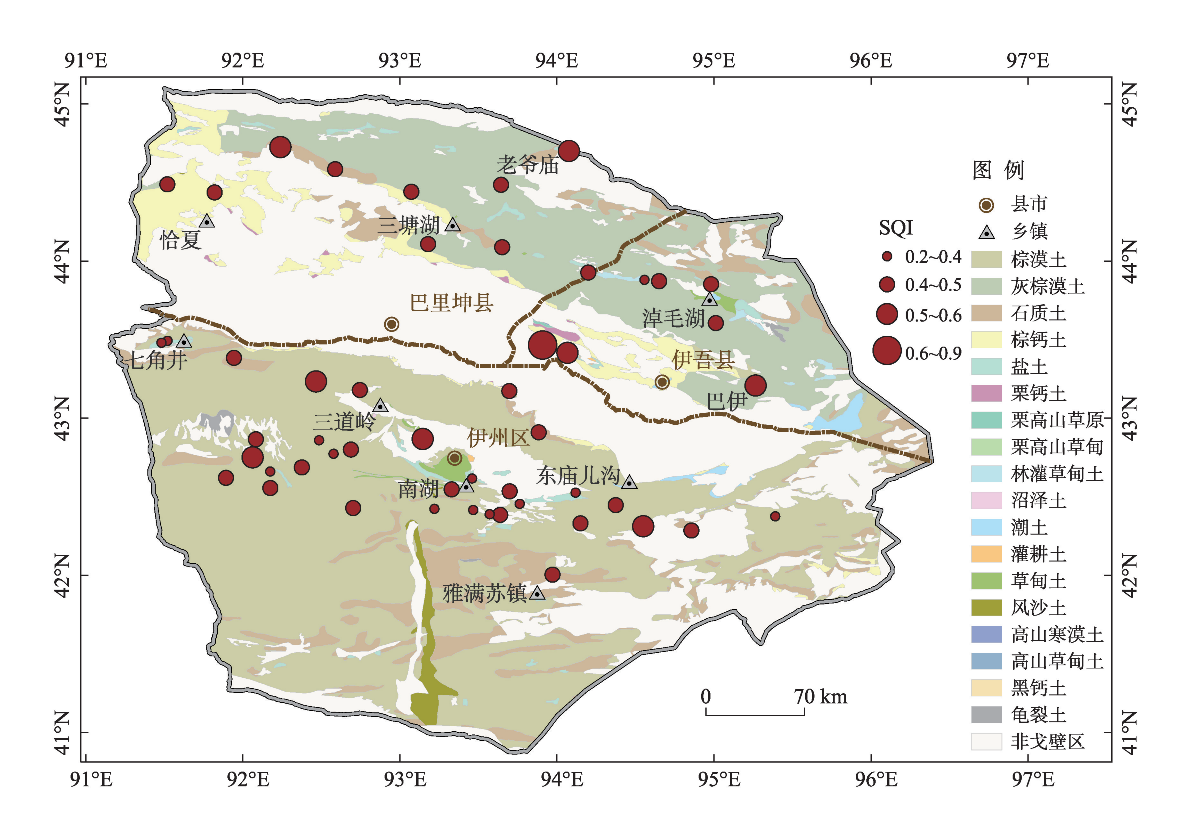


图2 哈密市戈壁土壤质量指数的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of soil quality indices in the Hami Gobi

石、砂石和砂粒的组成,砾石覆盖在东西向呈现较强的一致性,但从北到南呈现明显的增加趋势,尤其是在伊州区。在风速条件一定的情况下,戈壁土壤输沙率也会出现明显的空间差异[2,32];加之戈壁南部矿区开采活动频繁,极易破坏戈壁下垫面砾石覆盖层。一旦砾石覆盖被破坏,下层土壤失去屏障,对风蚀的抵抗作用迅速减弱,而且失去砾石覆盖的下层土壤对土壤水分的保持作用也会明显降低[33]。

从本研究采样调查来看,哈密市戈壁地区的砾石覆盖存在空间不均匀的特征,这种不均匀性使得部分区域更易受到风沙侵袭,主要分布在砾石覆盖低于20%,以及表层砾石厚度小于5 cm的区域,主要包括四类典型区域:(1) 砾石表层薄弱区,在砾石表层较薄或分布不连续的区域,地表的细粒土壤容易暴露,风蚀作用显著增强。这些区域通常是地形较为平坦或坡度较小的地方,风力能够直接作用于地表,主要分布在山前洪积扇的前、中、后缘区域、比如样点10、11、12、13、20、21等区域。(2) 砾石较少的低洼地带,低洼地带由于积水和沉积作用,砾石相对较少,形成砾幕屏障的能力较弱。这些地区的土壤更易被风吹起,形成沙尘暴。比如样点1、2、21、55、56等区域。(3) 人为活动频繁区域,尤其是矿山开采和道路建设等活动,主要分布在伊州区南部,比如样点35、36、37等区域。(4)边缘过渡带,戈壁向沙漠或其他地类过渡的边缘地带,由于地表砾石逐渐减少,地表类型改变,使得这些区域的土壤结构不稳定,易受风蚀影响,主要分布在巴里坤县和伊吾县从西到东戈壁边缘和伊州区七角井附近,比如样点27、28、29、37、39、41、46、55、56等区域。

3.2 哈密市戈壁土壤质量对植被分布的影响

戈壁地区的土壤质量和植被生长状况密切相关,土壤质量的贫瘠状态对植被的类型、分布和多样性具有显著影响。本研究发现哈密市戈壁地区的土壤质量整体较低,平均土壤质量指数(SQI)为0.44,许多区域的SQI低于0.4。土壤质量限制了植物的生长和多样性,植被种类以灌木、多年生草本等耐旱植物为主,如梭梭、红砂、霸王、猪毛菜等,这些植物适应了土壤中的低营养和水分条件[34]。戈壁地区土壤质量存在较大的空间分异性,不同区域的土壤质量差异显著。其中,伊吾县戈壁区土壤质量相对较高,分布有营养较高的草甸土和栗钙土,土壤水分含量也较其他区域高,植被类型较为丰富,以胡杨、红柳为主的荒漠林–灌木群落。相比之下,伊州区和巴里坤县戈壁区的土壤质量较低,植被适应了极端干旱和土壤贫瘠的环境,为耐旱的灌木和草本植物。

哈密市戈壁地区的土壤质量和植被状况显示出该地区戈壁生态系统非常脆弱。极端干旱条件下戈壁植被群落对外在条件的变化适应性较差,一旦遭到破坏,恢复难度极大[20,34]。同时,由于土壤质量低及水分缺乏,植物区系表现出强烈的旱生特点,植物种类少且生态位狭窄,生态系统的稳定性较差。此外,黑戈壁地区的植物是重要的植物基因库,保护这些植物基因资源需要对其生态系统的整体保护,在开发这些地区的能源矿产资源时需要保护戈壁地区的旱生植被生态系统[3,20]。虽然提高土壤质量会促进植物增长和多样性的提升,如人工灌溉或土壤改良技术可以增加土壤水分和营养含量[4,34],但成本高昂,仅在特殊条件下开展矿区环境恢复的条件下实施,其可持续较差。因此,戈壁区域土壤质量低下和植被单一是相互关联的。戈壁区域的土壤质量低导致植被种类少且特化,生态系统脆弱,难以恢复。

3.3 哈密市戈壁土壤质量空间分异影响因素

戈壁土壤质量的空间格局受到多种自然和人文因素的综合影响。首先,自然因素在区域尺度上的影响尤为显著。哈密地区的地貌特征差异明显,东天山山脉北部大部分地区为洪积扇堆积戈壁,土壤因母质较新且富含矿物质而相对肥沃[2,21],再加上地形平缓、排水良好,因而形成了相对优质的土壤条件,比如伊吾县及巴里坤县的东侧。而天山以南大部分地区为平原剥蚀型戈壁,由于长期受风蚀运动的影响,土壤母质老化且土壤水分蒸发量大[2,5],导致土壤结构较为贫瘠。

气候条件和外力侵蚀也是影响土壤质量的重要自然因素。哈密地区整体气候干旱,年降水量极低,尤其是伊州区和巴里坤县降水稀少,风速较大[15,30],风蚀作用显著,导致这些区域的土壤质量普遍偏低。伊吾县由于地形因素,植被覆盖相对较高[20],土壤水分和有机质含量相对较多,有助于减缓风蚀的影响,土壤质量因而相对较好。而伊州区和巴里坤县,植被稀疏且耐旱植物居多,土壤有机质含量较低,进一步加剧了土壤的贫瘠化。此外,哈密南部地区的人类活动,特别是矿区开采和道路建设[4-5],不

仅破坏了地表植被和土壤结构,还加剧了土壤侵蚀和退化的速度。伊州区东部和南部大量矿区及其周边区域,由于地表砾石和砂层被破坏,土壤变得更加脆弱,对风蚀的抵抗能力显著下降[2,4,33],导致土壤质量进一步恶化。相对而言,伊吾县戈壁的人类活动较少,土壤受到的外界干扰相对较小,因此土壤质量较其他两个分区更高。综合来看,哈密地区戈壁土壤质量的空间分异性主要由自然因素决定,但人文因素的影响也不容忽视。地形地貌、气候条件、植被类型和外力侵蚀等自然因素在区域尺度上起主导作用,而人类活动则在局部区域对土壤质量产生影响。

4 结 论

本文以哈密市为研究区调查戈壁土壤的砾石结构和性状特征,在伊州区、伊吾县和巴里坤县共采集了56个戈壁土壤样本,检测了土壤含水量、土壤容重、pH、总盐、有机质、全氮、全磷和全钾等8个物理和化学指标。首先用描述性统计分析了该地区土壤的地表结构、盐碱化和土壤养分特征。进而基于8个土壤质量指标构建土壤质量指数(SQI)来评估该地区的土壤质量相对水平。发现哈密市戈壁地区土壤质量有以下特征:(1)戈壁区域的砾石覆盖度普遍较高,戈壁边缘的砾石覆盖度相对较低,土壤质地坚实;土壤含水量普遍较低,盐碱化程度相对较高;大部分区域的土壤相对贫瘠,养分条件较差。(2)从空间差异来看,伊吾县和巴里坤县戈壁土壤质量的平均水平要略高于伊州区。戈壁与其他地类过渡区域的土壤质量水平较纯戈壁区域更高,土壤含水量和养分条件均优于纯戈壁区域。(3)综合评价,哈密市戈壁全区域及三个分区的土壤质量均处于较低水平(SQI介于0.4~0.5)。土壤质量水平呈现从北到南下降的趋势,其中,伊吾县戈壁土壤质量的平均水平最高。

参考文献(References):

[1] 冯益明, 吴波, 姚爱冬, 等. 戈壁分类体系与编目研究[J]. 地理学报, 2014, 69(3): 391−398. [Feng Yiming, Wu Bo, Yao Aidong, et al. A study on classification system and inventory of gobi[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(3): 391−398.]

[2] 高君亮. 干旱区洪积扇戈壁表层沉积物特征研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2019. [Gao Junliang. Characteristics of Surface Sediments of the Alluvial Fan Gobi in Arid Area[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2019.]

[3] 张和钰. 天山南麓中段戈壁区植被空间分布格局及其形成机制研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2021. [Zhang Heyu. The Spatial Distribution Pattern and Formation Mechanism of Vegetation in the Gobi Region in the Middle Section of the Southern Piedmont of Tianshan Mountains[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2021.]

[4] 于昊辰. 新疆荒漠矿区土地生态系统退化评价及调控策略研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022. [Yu Haochen. Measurement and Regulation Strategies of Land Ecosystem Degradation for Desert Mining Area in Xinjiang[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.]

[5] 高尚武. 新疆戈壁和沙漠的初步调查研究[J]. 林业科学, 1963(1): 56−68. [Gao Shangwu. A preliminary study of the Gobi and deserts of Xinjiang[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1963(1): 56−68.]

[6] 刘占锋, 傅伯杰, 刘国华, 等. 土壤质量与土壤质量指标及其评价[J]. 生态学报, 2006, 26(3): 901−913. [Liu Zhanfeng, Fu Bojie, Liu Guohua, et al. Soil quality: Concept indicators and its assessment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(3): 901−913.]

[7] Abdel Rahman M A E, Tahoun S. GIS model-builder based on comprehensive geostatistical approach to assess soil quality[J]. Remote Sensing Applications-Society and Environment, 2019, 13: 204−214.

[8] Saleh A M, Elsharkawy M M, AbdelRahman M A E, et al. Evaluation of Soil Quality in Arid Western Fringes of the Nile Delta for Sustainable Agriculture[J]. Applied and Environmental Soil Science, 2021, 13: 434692.

[9] 王忠臣, 钱亦兵, 张海燕, 等. 东天山喀尔里克山北坡−淖毛湖盆地土壤理化性状的空间分布特征[J]. 干旱区地理, 2011, 34(1): 107−114. [Wang Zhongchen, Qian Yibing, Zhang Haiyan, et al. Spatial distribution of soil physical-chemical properties in the region of the northern slopes of Karlike Range in East Tianshan Mountains to Naomaohu Basin[J]. Arid Land Geography, 2011, 34(1): 107−114.]

[10] Swanepoel P A, du Preez C C, Botha P R, et al. Assessment of tillage effects on soil quality of pastures in South Africa with indexing methods[J]. Soil Research, 2015, 53(3): 274−285.

[11] 黄洲, 杨广, 苏军, 等. 水资源"三条红线"约束下玛纳斯河灌区退耕土壤质量评价[J]. 干旱区研究, 2022, 39(6): 1942−1951. [Huang Zhou, Yang Guang, Su Jun, et al. Soil quality evaluation of returning farmland to Manas River irrigation area under the constraints of the "Three Red Lines" strategy of water resources[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(6): 1942−1951.]

[12] Wang A, Zhang Y, Wang G, et al. Soil physicochemical properties and microorganisms jointly regulate the variations of soil carbon and nitrogen cycles along vegetation restoration on the Loess Plateau, China[J]. Plant and Soil, 2024, 494(1−2): 413−436.

[13] Zhang Q, Fan J, Jia M, et al. Impacts of long-term abandonment of

alfalfa plantations on soil physicochemical properties and plant diversity in an agricultural pastoral ecotone[J]. Plant and Soil, 2023, 493(1): 519-534.

[14] Yin H, Zhang Z, Jia L, et al. Impact of long-term fencing measures on soil physicochemical and stoichiometry characteristics of desert steppe in alpine regions[J]. Global Ecology and Conservation, 2023, 45: e02535.

[15] 刘茜雅. 戈壁地表沉积物组分空间异质性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021. [Liu Xiya. Study on Spatial Heterogeneity of Surface Sediment Components in Gobi[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.]

[16] Liu X, Wang H, Zuo H, et al. Fractal of the Gobi surface sediment components and its variability characteristics[J]. Catena, 2022, 218: 106525.

[17] Wang Y, Zhang J, Dun H, et al. Numerical investigation on impact erosion of aeolian sand saltation in Gobi[J]. Atmosphere, 2023, 14(2): 349.

[18] Bahadur A, Zhang Z, Sajjad W, et al. Bacterial community structure and functions in microhabitats associated with black stones in Black Gobi Desert, China[J]. Ecological Indicators, 2022, 142: 109168.

[19] 杜华栋, 刘研, 毕银丽, 等. 干旱砾漠区不同微地貌单元土壤性状及真菌群落变化特征[J]. 干旱区研究, 2024, 41(3): 421-431. [Du Huadong, Liu Yan, Bi Yinli, et al. Characteristics of soil properties and fungal community changes indifferent microgeomorphic units in an arid gravel desert area[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(3): 421-431.]

[20] 王健铭, 董芳宇, 巴海·那斯拉, 等. 中国黑戈壁植物多样性分布格局及其影响因素[J]. 生态学报, 2016, 36(12): 3488-3498. [Wang Jianming, Dong Fangyu, Bahai Nasra, et al. Plant distribution patterns and the factors influencing plant diversity in the Black Gobi Desert of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(12): 3488-3498.]

[21] 中国黑戈壁地区生态本底科学考察队. 中国黑戈壁研究[M]. 北京: 科学出版社, 2014. [Scientific Expedition on Ecological Background Resources in the Black Gobi Region of China. The Black Gobi of China[M]. Beijing: Science Press, 2014.]

[22] 王叶堂, 侯书贵, 鲁安新, 等. 近40年来天山东段冰川变化及其对气候的响应[J]. 干旱区地理, 2008, 31(6): 813-821. [Wang Yetang, Hou Shugui, Lu Anxin, et al. Response of glacier variations in the eastern Tianshan Mountains to climate change during the last 40 years[J]. Arid Land Geography, 2008, 31(6): 813-821.]

[23] 袁娜娜. 室内环刀法测定土壤田间持水量[J]. 中国新技术新产品, 2014(9): 184. [Yuan Nana. Determination of soil water holding capacity in the field by indoor ring knife method[J]. New Technology & New Products of China, 2014(9): 184.]

[24] 盛建东, 杨玉玲, 陈冰, 等. 土壤总盐、pH及总碱度空间变异特征研究[J]. 土壤, 2005, 37(1): 69-73. [Sheng Jiandong, Yang Yuling, Chen Bing, et al. Spatial variability of soil total salt, pH and total alkalinity[J]. Soils, 2005, 37(1): 69-73.]

[25] 李婧. 土壤有机质测定方法综述[J]. 分析试验室, 2008(增刊): 154-156. [Li Jing. Review of soil organic matter determination methods[J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2008(Suppl.): 154-156.]

[26] 张丽娜, 李军, 范鹏, 等. 黄土高原典型苹果园地深层土壤氮磷钾养分含量与分布特征[J]. 生态学报, 2013, 33(6): 1907-1915. [Zhang Lina, Li Jun, Fan Peng, et al. Distribution of soil NPK nutrient content in deep soil profile of typical apple orchards on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(6): 1907-1915.]

[27] Torbert H A, Krueger E, Kurtener D. Soil quality assessment using fuzzy modeling[J]. International Agrophysics, 2008, 22(4): 365-370.

[28] 曹萌豪. 宁夏中部干旱区不同压砂作物对土壤质量的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2023. [Cao Menghao. Effects of Different Sand-Compacting Crops on Soil Quality in The Central Dry Zone of Ningxia[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2023.]

[29] 贡璐, 张雪妮, 冉启洋. 基于最小数据集的塔里木河上游绿洲土壤质量评价[J]. 土壤学报, 2015, 52(3): 682-689. [Gong Lu, Zhang Xueni, Ran Qiyang. Quality assessment of oasis soil in the upper reaches of Tarim river based on minimum data set[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(3): 682-689.]

[30] 黄雨晖, 韩小元, 赵健, 等. 新疆戈壁地区风沙流结构及其粒径特征研究[J]. 气象与减灾研究, 2019, 42(3): 199-205. [Huang Yuhui, Han Xiaoyuan, Zhao Jian, et al. Study on wind-blown sand flow structure and particle size characteristics in gobi area of Xinjiang[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 2019, 42(3): 199-205.]

[31] 李悦, 王海兵, 廖承贤, 等. 戈壁风沙运动及其对下垫面砾石盖度影响的风洞模拟[J]. 中国沙漠, 2024, 44(3): 194-201. [Li Yue, Wang Haibing, Liao Chengxian, et al. Wind tunnel simulation of gobi sand movement and its effect on gravel cover age of underlying surface[J]. Journal of Desert Research, 2024, 44(3): 194-201.]

[32] 肖朋. 砾石覆盖情形下输沙率变化研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2023. [Xiao Peng. Study on The Change of Sediment Transport Rate Under Gravel Cover[D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2023.]

[33] 谭立海, 张伟民, 边凯, 等. 砾石覆盖固沙措施水土保持作用研究——以库布齐沙漠北缘为例[J]. 水土保持研究, 2017, 24(6): 172-178. [Tan Lihai, Zhang Weimin, Bian Kai, et al. Effect of gravel mulch on soil and water conversation: A case study in the northern edge of Hobq desert[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(6): 172-178.]

[34] 夏延国, 宁宇, 李景文, 等. 中国黑戈壁地区植物区系及其物种多样性研究[J]. 西北植物学报, 2013, 33(9): 1906-1915. [Xia Yanguo, Ning Yu, Li Jingwen, et al. Plant species diversity and floral characters in the Black Gobi Desert of China[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2013, 33(9): 1906-1915.]

Physicochemical characteristics and quality assessment of Gobi soils, Hami City, China

ZHANG Jiudan[1,2], ZHANG Aiguo[3], JIN Jingyu[1,2,4], LIU Shuaiqi[1,2], WU Han[1,2], LI Junli[1]

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, Jiangsu, China; 4. Survey and Mapping Achievement Center of Xinjiang, Urumqi 830002, Xinjiang, China)

Abstract: Soil quality is essential for vegetation cover and ecological recovery in Gobi zones. In this study, we analyzed 56 typical soil samples from the Hami Gobi to evaluate soil texture, salinity, and nutrient characteristics using eight indices, including soil moisture content, soil bulk density, pH, total salt content, organic matter, total nitrogen, total phosphorus, and total potassium. Based on these indices, we constructed a soil quality index (SQI) for a comprehensive soil quality assessment. The results revealed that soil quality in the Hami Gobi region was generally low, characterized by high gravel cover, low moisture content, severe salinization, and nutrient deficiency. The average soil quality in the Yiwu and Barkol regions was slightly higher than in the Yizhou zone, with better soil quality observed in areas where Gobi transitions into other land types. Overall, the SQI ranged from 0.4 to 0.5 across the Hami Gobi region and its subregions, showing a decreasing trend from north to south. This study highlights the urgent need for enhanced environmental protection and sustainable development strategies to copy with the impact of increasing human activities on the ecosystem.

Keywords: Gobi; soil nutrients; gravel cover; salinization; soil quality index; Hami City